

# BDS/GPS 对流层延迟估计及对精密单点定位的影响\*

邓 标<sup>1</sup> 王伟娜<sup>2</sup> 王延霞<sup>1</sup>

1(滁州学院地理信息与旅游学院 滁州 239000)

2(上海城建职业学院数字建造学院 上海 201103)

**摘 要** 针对对流层湿延迟参数估计及水平梯度处理策略对精密单点定位影响的问题, 以 9 个多系统实验网实测数据为基础, 设计了 6 种对流层延迟处理方案并进行实验. 实验结果表明, 观测时长在 8 h 时段内, BDS/GPS 定位模式下, 对流层延迟的水平梯度处理不宜采用随机游走模型; 采用随机游走估算对流层湿延迟参数, 且不估算或使用分段常数处理水平梯度的策略相对占优. 动静态精密单点定位结果显示, BDS/GPS 采用分段常数或随机游走进行对流层湿延迟参数估算和分段常数处理水平梯度的策略相对占优, 采用随机游走处理水平梯度的策略稍弱. 总体而言, BDS 较 GPS 估算的对流层延迟及定位精度稍弱; 海洋周边 6 种方案解算结果差异较内陆站大. 静态精密单点定位模式下, 随着观测时长的增加, 6 种方案定位误差趋势趋于一致, 误差大小基本在 2 cm 内, 观测时长大于 12 h 时, 随机游走估算对流层湿延迟参数和不考虑水平梯度的处理策略整体较优.

**关键词** 精密单点定位, 对流层延迟, 分段常数, 随机游走, 精度分析

**中图分类号** P228

## BDS/GPS Zenith Tropospheric Delay Estimation and Its Effect on Precise Point Positioning

DENG Biao<sup>1</sup> WANG Weina<sup>2</sup> WANG Yanxia<sup>1</sup>

1(School of Geographic Information and Tourism, Chuzhou University, Chuzhou 239000)

2(School of Digital Construction, Shanghai Urban Construction Vocational College, Shanghai 201103)

**Abstract** The influence of zenith wet delay parameter estimation and horizontal troposphere gradient processing strategy on precise point positioning is studied. Six zenith tropospheric delay processing schemes were designed and experimented on the basis of the measured data from nine Multi-GNSS Experiment stations. The experimental results show that, during the 8 h observation period, it is not suitable to use the random walk model to deal with the horizontal troposphere gradient of the zenith wet delay in the BDS/GPS Precise Point Positioning mode; and the strategies of estimating the zenith wet de-

\* 安徽省教育厅重点项目资助 (KJ2021A1084, 2022xjzlt030)

2022-09-13 收到原稿, 2023-06-10 收到修定稿

lay parameter by random walk and handling the horizontal troposphere gradient without estimating or using the piecewise constant are relatively advantageous. The results of the dynamic and static precise point positioning show that the BDS/GPS strategy of estimating the zenith wet delay parameter and processing the horizontal troposphere gradient with piecewise constant or random walk is relatively superior, while the strategy of processing the horizontal troposphere gradient with random walk is slightly weaker. Overall, the zenith tropospheric delay and precise point positioning accuracy estimated by BDS is slightly weaker than that by GPS; the differences in the results of the six schemes around the ocean are larger than those of the inland stations. In the static Precise Point Positioning mode, with the increase of observation time, the trend of Precise Point Positioning errors of the six schemes tends to be the same, and the error size is basically within 2 cm. When the observation time is longer than 12 h, the strategy of estimating the zenith wet delay parameter by random walk and not considering the horizontal troposphere gradient is better overall.

**Key words** Precise point positioning, Zenith tropospheric delay, Piecewise constant, Random walk, Precision analysis

## 0 引言

全球卫星导航系统中, 对流层延迟 (Zenith Tropospheric Delay, ZTD) 误差是一项十分重要的误差源<sup>[1-2]</sup>. 该误差与卫星高度角有关, 高度角接近 0 时, 延迟误差可能超过 20 m<sup>[3]</sup>. 如何有效减弱对流层延迟误差对定位精度的影响, 成为当前高精度 GNSS 导航定位的重要课题之一. 为此, 国内外专家学者进行了大量研究, 文献 [4-8] 通过构建或优化对流层延迟模型, 分析了新模型和优化模型解算的对流层延迟误差通常在 3~6 cm 之间; 文献 [9] 发现随机游走 (Random Walk, RW) 模型对短基线模糊度固定率约有 60% 的改善; 文献 [10-12] 分别提出了新的对流层延迟模型算法, 取得了一定效果; 文献 [13] 提出了一种几何特定的对流层延迟处理策略, 并验证该方法的有效性; 文献 [14] 发现在阴雨环境和卫星高度角较低的情况下, 进行对流层延迟水平梯度 (Horizontal Troposphere Gradient, HTG) 改正, 对精密单点定位 (Precise Point Positioning, PPP) 的定位精度改善明显; 文献 [15] 提出了顾及映射函数误差的对流层延迟估计法, 取得 cm 级甚至 mm 级的精度; 文献 [16] 将对流层延迟算法引入原始模糊度方程中, 取得单历元平面精度优于 1 cm、高程精度提升约 6 cm 的效果.

尽管针对对流层延迟模型及算法进行了大量的研究, 但对对流层湿延迟 (Zenith Wet Delay, ZWD) 参数估算和水平梯度处理策略的组合探讨较少. 特别是随着 BDS 技术的发展, 处理好 BDS 和 GPS 精密

单点定位中对流层延迟的问题, 对提升精密单点定位精度至关重要. 鉴于此, 本文以国际 GNSS 服务 (International GNSS Service, IGS) 跟踪站中的 9 个多系统实验网 (Multi-GNSS Experiment, MGEX) 站实测数据及武汉大学 IGS 数据分析中心发布的精密数据为基础, 分别采取随机游走、分段常数 (Piecewise Constant, PWC) 等对流层湿延迟参数估计及水平梯度处理策略, 评估不同参数估计模式与处理策略对对流层延迟和精密单点定位的影响, 探索减弱对流层延迟误差对 GNSS 精密单点定位影响的最优处理策略.

## 1 对流层延迟模型

对流层延迟分为干分量和湿分量, 精密单点定位中对流层延迟改正的常用方法是将模型作为先验值, 将残余的对流层延迟估计为分段常数或随机游走噪声估计, 并通过投影函数投影至信号传播方向, 对流层总延迟可以表示为<sup>[17-19]</sup>

$$\Delta T = m_d T_{ZDD} + m_w(z) T_{ZWD} + \frac{\partial m_w(z)}{\partial(z)} G_n T_{ZWD} \cos A + \frac{\partial m_w(z)}{\partial(z)} G_e \sin A T_{ZWD}. \quad (1)$$

其中,  $\Delta T$  为传播路径方向的总延迟,  $m_d$  为干分量投影函数,  $T_{ZDD}$  为天顶方向干延迟,  $m_w$  为湿分量投影函数,  $T_{ZWD}$  为天顶方向湿延迟,  $z$  为卫星视线到天顶方向的高度角,  $G_n$  和  $G_e$  分别为东西向和南北向两个梯度因子,  $A$  为方位角,  $\partial m_w(z)/\partial(z)$  表示投影函数对高

度角的偏导<sup>[19]</sup>, 可表示为

$$\frac{\partial m_w(z)}{\partial(z)} = -m_w(z) \frac{1}{\tan z}. \quad (2)$$

将式 (2) 代入式 (1) 即可得到引入梯度参数的对流层湿延迟模型.

## 2 对流层延迟处理策略

### 2.1 对流层延迟处理模型

对流层湿延迟参数估算和水平梯度处理策略中常用的模型为分段常数模型和随机游走模型, 模型具体原理如下.

分段常数模型的核心思想是: 水汽的时空变化虽然具有随机性, 但水汽特征在短时间内是相对稳定的, 该模型将整个观测时段分成  $N$  个相等时段, 每个时段内包含  $K$  个相等的观测历元, 即每隔一定的历元间隔  $K$  估计一个湿延迟参数 (待定的常数). 若在  $j$  个时段上 (从第  $I$  个历元到第  $I + K$  个历元的两个节点间), 则有<sup>[20]</sup>

$$\rho_j = \rho(I), I \leq j \leq I + K. \quad (3)$$

每个测站经平差可求得  $N$  个天顶方向的对流层折射改正量  $\rho_j (j = 1, 2, \dots, N)$ .  $N$  的大小可根据各观测时段的长短及测站的具体情况而定, 通常每个时段为 2~3 h. 得到的总延迟为

$$\Delta T = m_d T_{ZTD} + m_w T_{ZWD}(i), 0 \leq i \leq N. \quad (4)$$

随机游走模型的思想为, 对流层湿延迟随时间的变化虽然无明显规律, 但其较符合随机游走的过程, 即具有明显的时间和空间相关性, 具体模型如下:

$$\begin{cases} T_{ZWD}(k) = T_{ZWD}(k-1) + \omega_k, \\ \omega_k \sim N(0, \sigma_0). \end{cases} \quad (5)$$

即当前历元的  $T_{ZWD}$  参数保持上一历元的 Kalman 滤波解, 并包含服从高斯正态的随时间变化部分.

### 2.2 对流层延迟处理策略

为了分析对流层延迟不同参数估计及处理策略对 BDS(包含 BDS-2 和 BDS-3) 和 GPS 精密单点定位的影响, 选取多系统实验网中 9 个站点 (JFNG, KITG, MAL2, METG, POTS, PTGG, SGOC, SUTM 及 ULAB) 2022 年 4 月 10 日前 8 h (GPS 时) 的观测数据进行实验, 站点分布见图 1 (SUTM, MAL2, SGOC, PTGG 在大洋周边, 其他站基本在内

陆区域), 实验方案与处理策略列于表 1.

实验分别利用 BDS 与 GPS 独立进行, 各方案解算出的对流层延迟、定位坐标与 IGS 分析中心发布的参考值进行比较分析. 实验参数设置见表 2, 不同方案除对流层湿延迟参数解算和水平梯度处理策略差异外, 其他参数均一致. 采用开源软件 PRIDE-AR<sup>[21]</sup> 进行数据处理.

## 3 实验与分析

### 3.1 对流层延迟解算差异性

为了分析 6 种方案解算的对流层延迟差异性, 图 2 给出了静态模式下 JFNG 站的对流层延迟误差时序变化, 图 2(a) 和图 2(b) 为 BDS 和 GPS 解算的对流层延迟误差时间序列. 图 3(a) 和图 3(b) 为 BDS 和 GPS 解算的 9 个测站不同方案的对流层延迟误差 RMS 统计直方图.

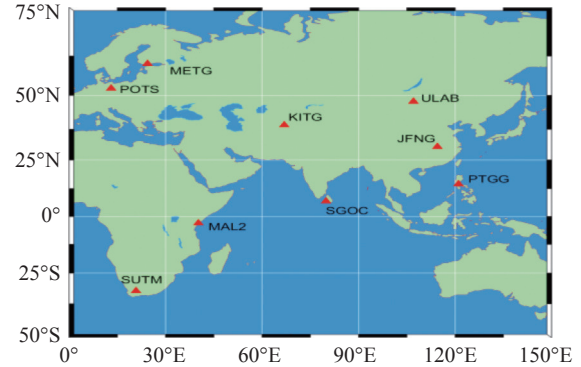


图 1 多系统实验网点位分布

Fig. 1 Location distribution of MGEX stations

表 1 对流层延迟参数估计与处理策略

Table 1 Parameters' estimation and data processing strategies of ZTD

| 方案  | 对流层湿延迟参数解算 | 对流层水平梯度处理策略 | 标注      |
|-----|------------|-------------|---------|
| 方案1 | PWC        | NO          | PWC-NO  |
| 方案2 | PWC        | PWC         | PWC-PWC |
| 方案3 | PWC        | RW          | PWC-RW  |
| 方案4 | RW         | NO          | RW-NO   |
| 方案5 | RW         | PWC         | RW-PWC  |
| 方案6 | RW         | RW          | RW-RW   |

注 NO代表不考虑HTG.

表 2 精密单点定位参数估计及其处理策略设置

Table 2 Models and data processing strategies of PPP

| 处理方式 | 参数      | 处理策略        |
|------|---------|-------------|
| 数据处理 | 观测值     | L1和L2消电离层组合 |
|      | 采样间隔    | 30 s        |
|      | 卫星截止高度角 | 15°         |
|      | 参数估计    | 最小二乘法       |
| 误差处理 | 定位模式    | 动态/静态       |
|      | 卫星轨道    | WHU精密星历     |
|      | 卫星钟差    | WHU精密钟差     |
|      | 地球自转参数  | WHU ERP     |
|      | 海洋潮模型   | 模型改正        |
|      | 相位偏差    | WHU偏差       |
|      | 相位缠绕    | 模型改正        |
|      | 对流层投影函数 | VMF3        |
| 参数估计 | ZWT估算模式 | PCW/RW      |
|      | HTG估算模式 | PCW/RW/NO   |
|      | PWC时长   | 2 h         |
|      | 模糊度     | 不固定         |
|      | 接收机钟差   | 高斯白噪声       |

由图 2 可知, 不同方案解算的对流层延迟存在一定的差异, 在 BDS 与 GPS 模式下, 方案 1~3 的对流层延迟解算误差均出现跳跃的节点, 表明采用分段常数法估算的对流层湿延迟具有跳跃性, 主要原因是分段常数模型在不同时段内采用不同常数估算所致. 而方案 4 至方案 6 采用随机游走模型解算的对流层延迟则相对较平滑; BDS 和 GPS 处理的对流层延迟误差趋势均表现出方案 1~3 趋势一致, 方案 4~6 趋势一致的特性; 对流层延迟解算误差大小表现为方案 1 与 4 近似, 方案 2 与 5 接近, 方案 3 与 6 类似的特性, 说明水平梯度处理策略影响对流层延迟量解算误差的趋势, 而对流层延迟误差的大小由对流层湿延迟参数解算和水平梯度处理策略共同影响.

由图 3 可以看出, 在观测时长为 8 h 的情况下, BDS 解算的对流层延迟精度在内陆区域误差 RMS 值一般在 1.8 cm 内, 海洋区域 PTGG 站方案 3 出现 RMS 值为 3 cm 左右的解算误差. GPS 解算的对流层延迟在内陆和海洋周边相对较稳定, 其 RMS 值一般在 1.3 cm 以内. BDS 解算的对流层延迟精度稳定性总体上略低于 GPS, 这主要与 BDS 的卫星钟差稳

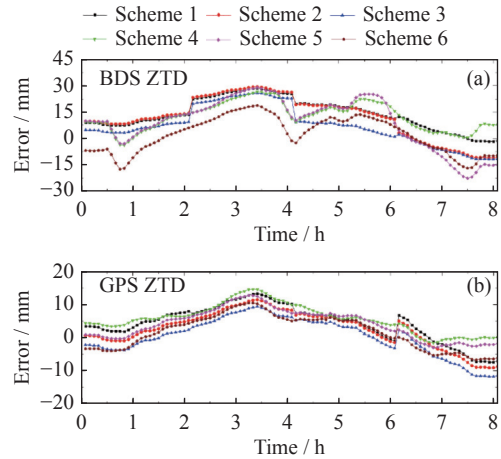


图 2 JFNG 站对流层延迟解算误差时间序列

Fig. 2 ZTD estimation error time series of JFNG station

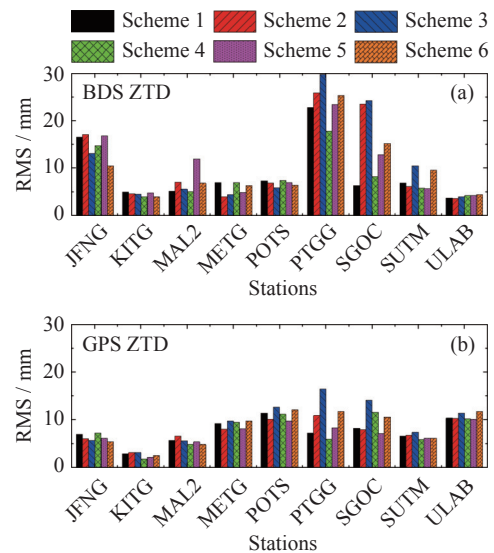


图 3 9 个测站的对流层延迟误差 RMS

Fig. 3 ZTD error RMS of 9 stations

定性有关. 海洋周边区域 6 种方案解算的对流层延迟差异较内陆区域明显偏大, 一定程度上和海洋周边上空大气湿度变化有关. 总体上 BDS 模式下方案 4 解算的对流层延迟精度占优, GPS 模式下方案 5 解算的对流层延迟相对占优.

### 3.2 动态定位实验

因缺乏可靠的外部坐标作为参考, 以 2.2 节中静态数据为基础, 采用动态定位算法进行模拟动态定位. 对比动态观测数据, 静态观测数据质量一般较好, 有较少的周跳, 是理想的实验数据<sup>[22]</sup>. 图 4(a)~(c) 和图 4(d)~(f) 分别为 BDS 和 GPS 模式下 JFNG 站动态

精密单点定位误差的时序图, 图 5(a)~(c) 和图 5(d)~(f) 分别为 9 个测站不同方案 BDS 和 GPS 定位误差的 RMS 值。

由图 4 可发现, 动态精密单点定位模式下, JFNG 站单 BDS 和单 GPS 定位 N 向误差较小的方案均为方案 1 和方案 4, E 向误差相对较小的方案均为方案 2 和方案 5, U 向误差相对较小的均为方案 1 和方案 4, 同时该坐标分量相对较好的还有 BDS 系统下的方案 5。

由图 5 可以看出, BDS 与 GPS 定位误差较大的站点大多位于大洋周边。虽然定位精度与卫星空间位置精度因子、多路径效应及卫星数等因素有关, 而海洋上空大气湿度、湍流等变化势必对解算造成影响。内陆区域动态精密单点定位 N 向误差方面, BDS 方案 1 和方案 4 相对占优; GPS 各方案差异较 BDS 小; E 向误差中 BDS 方案 2 和方案 5 相对占优, GPS 方案 1 占优; U 向误差方面, BDS 与 GPS 均表现出方案 2 和 5 相对占优的特性。海洋区域 BDS 和 GPS 定位误差均没有明显的规律性, 且多个方案间差异较内陆区域大。表明精密单点定位误差一定程度上与地理位置的干湿环境变化有关。在动态精密单点定位时, BDS 与 GPS 均不宜采用随机游走处理策略估算水平梯度, 且总体上 BDS 定位精度较 GPS 定位精度稍弱。

### 3.3 静态定位实验

静态精密单点定位实验仍采用 2.2 节设计的 6 种方案, 图 6(a)~(c) 和图 6(d)~(f) 分别为单 BDS 和单 GPS 系统下 9 个测站精密单点定位在 N, E 和 U 方向各坐标分量均值误差的统计结果。

由图 6 可知, 在观测时长为 8 h 条件下, 与动态定位结果类似, BDS 与 GPS 静态精密单点定位均在 PTGG、SGOC 和 MAL2 站出现相对较大的定位误差。内陆站单 BDS 和单 GPS 定位的误差基本在 4 cm 内。海洋周边区域, 单 BDS 和单 GPS 的 N 向定位误差均在 5 cm 内, E 和 U 向误差基本在 4 cm 内。总体而言, BDS 静态定位精度与 GPS 基本相当。两种定位系统在内陆区域, 总体上方案 2 和方案 5 较其他方案优; 在海洋区域各方向未表现明显的方案优势, 且方案间差异较内陆区域明显增大。

### 3.4 不同时长定位精度分析

为了探讨不同方案在不同观测时长条件下的差异, 降低卫星空间位置精度因子对实验结果的影响, 文中选取前文各方案差异较大且卫星空间位置精度因子较优的 JFNG 和 PTGG 站进行静态精密单点定位实验。实验方案同 3.3 节, 仅在观测时段上分别设置为 4, 8, 12, 16, 20, 24 h, 实验结果取各观测时长均值与 IGS 发布的参考值比较, 实验结果列于图 7 和

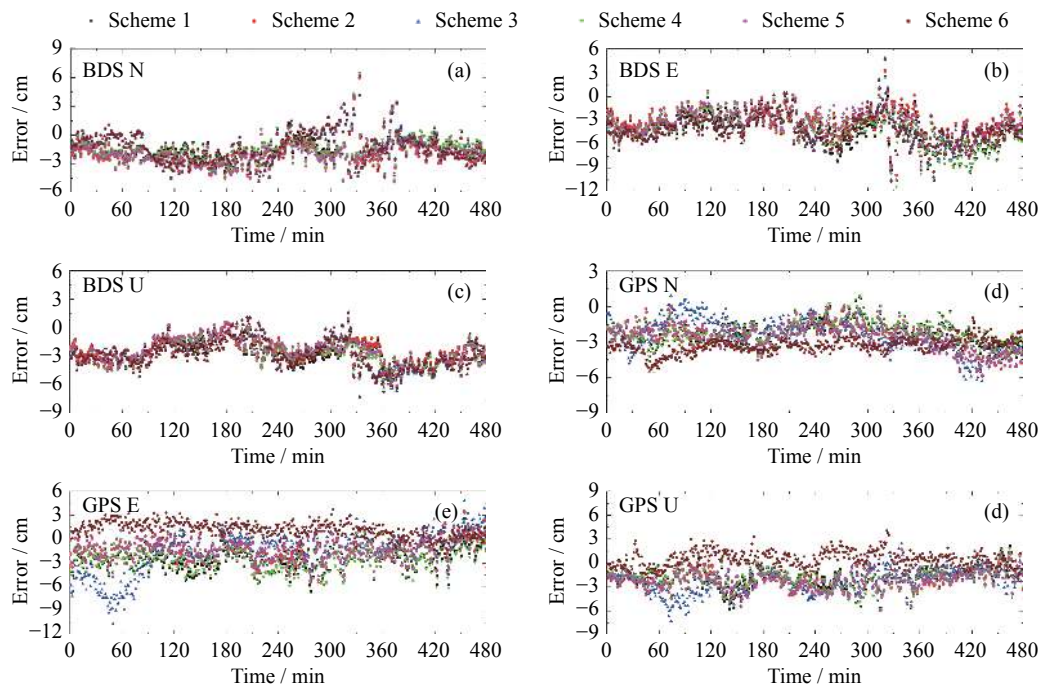


图 4 JFNG 站动态精密单点定位误差

Fig. 4 Error of dynamic PPP of JFNG station

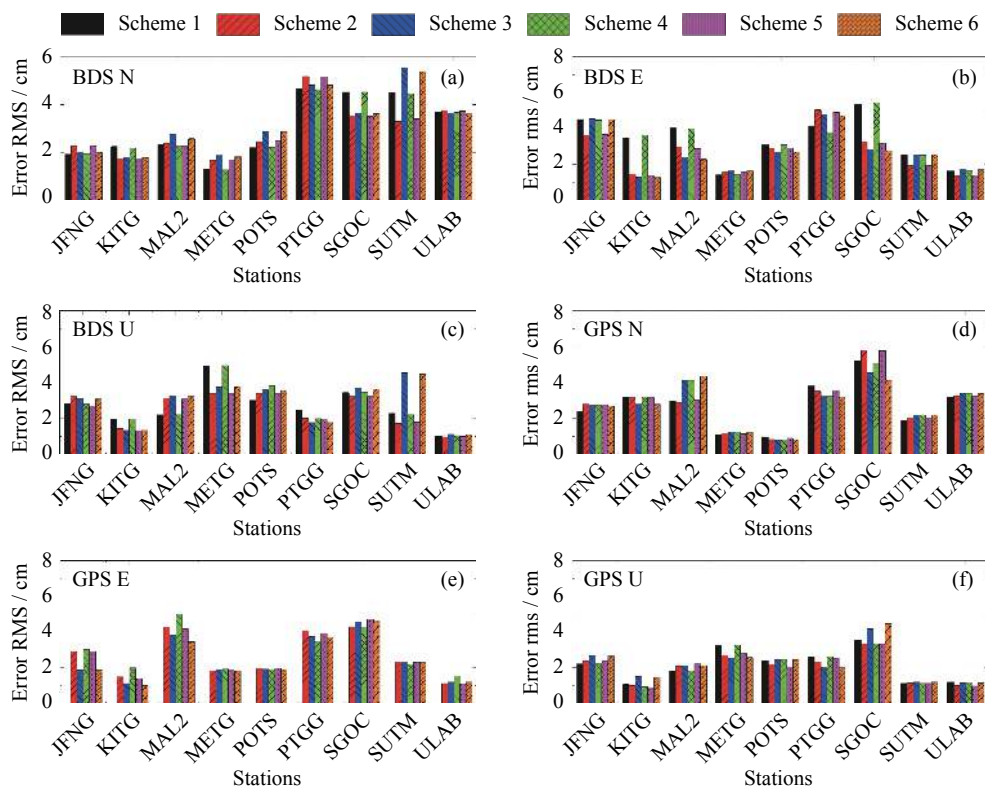


图 5 9 个测站动态定位误差的 RMS

Fig. 5 RMS of dynamic PPP error of 9 stations

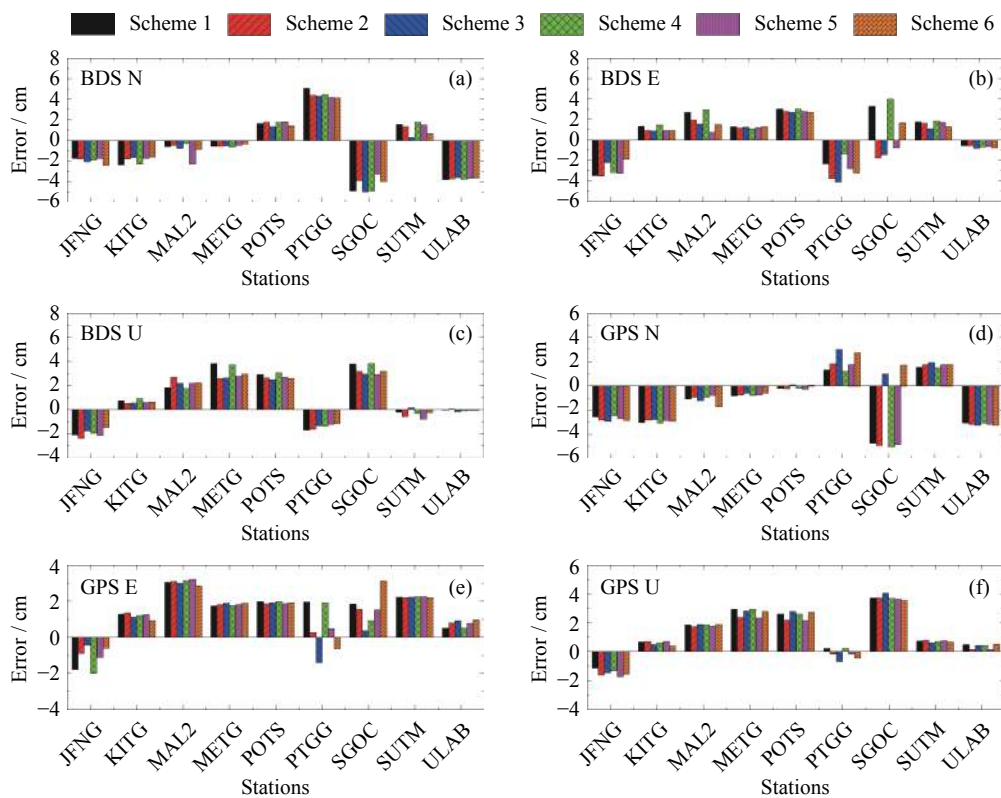


图 6 9 个测站的坐标均值误差

Fig. 6 Coordinate mean error of 9 stations

图 8. 图 7(a)~(f) 和图 8(a)~(f) 分别为 BDS 和 GPS 解算的 JFNG 和 PTGG 站坐标分量的误差.

由图 7 和图 8 可知, 在静态精密单点定位模式

下, JFNG 和 PTGG 站定位误差均随着观测时长的增加而降低, 表现出良好的收敛趋势. BDS 和 GPS 分别在 16 h 和 12 h 后各方案的定位误差趋于一致.

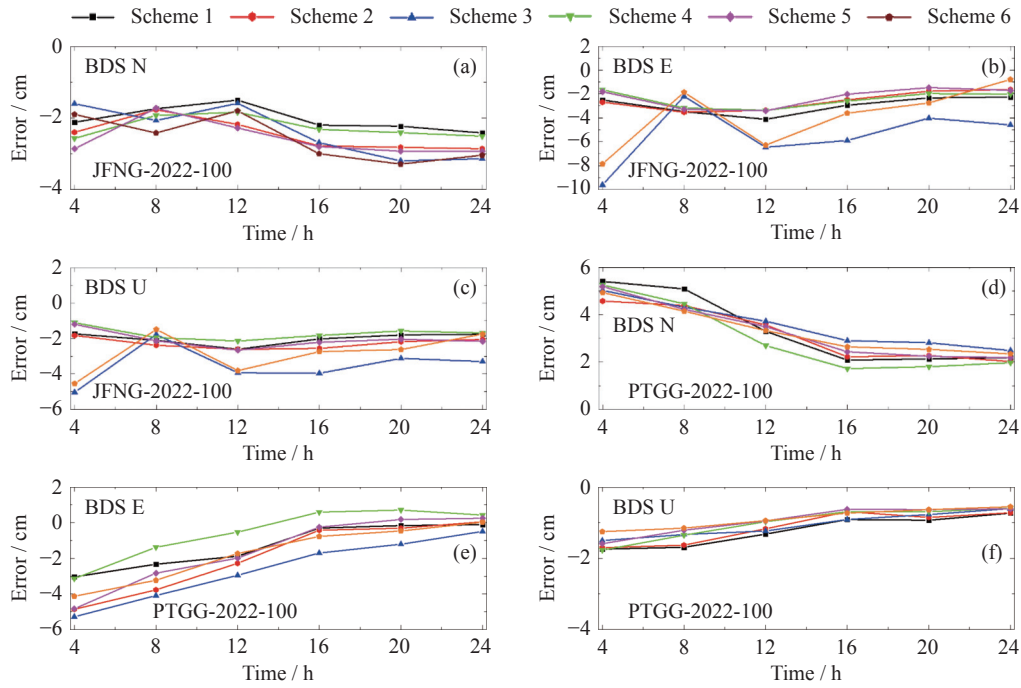


图 7 BDS 静态精密单点定位误差与时长关系

Fig. 7 Relationship between BDS static PPP error and time length

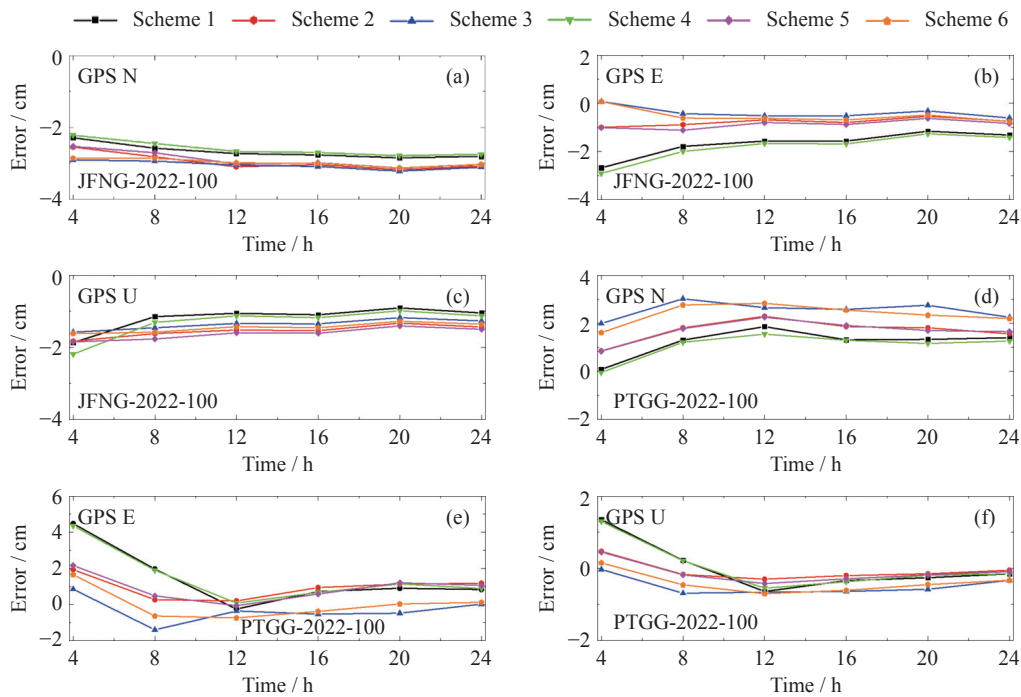


图 8 GPS 静态精密单点定位误差与时长关系

Fig. 8 Relationship between GPS static PPP error and time length

定位误差趋势表现为方案 1 和方案 4 类似, 方案 2 与方案 5 类似, 方案 3 和方案 6 类似, 此项趋势主要由水平梯度处理策略引起的, 而误差大小主要受对流层湿延迟参数解算和水平梯度处理策略综合影响. 0~12 h 期间方案 1 和方案 4 收敛速率较快, JFNG 和 PTGG 两站观测时长大于 12 h 后, 总体上方案 1 和方案 4 占优, 方案 2 和方案 5 其次, 方案 3 和方案 6 稍差. 观测时长增加, 各方案间差异逐步降低, 特别是观测时长大于 12 h 后, 6 种方案差异更小, 同时可以发现静态精密单点定位模式下, BDS 定位精度稳定性较 GPS 稍弱.

## 4 结语

为了探讨对流层延迟参数估计与水平梯度处理策略对 BDS/GPS 精密单点定位的影响, 设计了 6 种方案并进行实验. 结论如下: 对流层延迟解算方面, BDS 和 GPS 模式下, 分段常数估算对流层湿延迟引起的对流层延迟误差均出现跳跃性, 随机游走解算的对流层延迟误差则表现得相对平滑. 动/静态精密单点定位及对流层延迟估算均不宜采用随机游走模型进行水平梯度处理的策略. 观测时长 8 h 内 BDS 的对流层延迟估算和动态精密单点定位精度均较 GPS 稍弱, 静态定位精度和 GPS 基本相当. 海洋区域不同方案间差异较内陆区域大, 各方案未表现出明显规律性. 随着观测时长的增加, 各方案静态定位成果差异逐渐减少, 当定位时长超过 12 h 后, BDS 系统下各方案定位差异基本在 2 cm 内, GPS 基本在 1 cm 以内; BDS/GPS 精密单点定位中, 总体而言方案 1 和方案 4 定位成果相对最优.

## 参考文献

- [1] ZHU Mingchen, HU Wusheng, WANG Laishun. Accuracy test and analysis for GPT2w model in China[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, **44**(9): 1304-1311 (朱明晨, 胡伍生, 王来顺. GPT2w 模型在中国区域的精度检验与分析 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2019, **44**(9): 1304-1311)
- [2] WANG N B, LI Z S, LI M, *et al.* GPS, BDS and Galileo ionospheric correction models: an evaluation in range delay and position domain[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2018, **170**: 83-91
- [3] LIU Z, CHEN X H, LIU Q. Estimating zenith tropospheric delay based on GPT2w model[J]. *IEEE Access*, 2019, **7**: 139258-139263
- [4] LI Wei, YUAN Yunbin, OU Jikun, *et al.* A new global zenith tropospheric delay model IGGtrop for GNSS applications[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, **57**(17): 2132-2139 (李薇, 袁运斌, 欧吉坤, 等. 全球对流层天顶延迟模型 IGGtrop 的建立与分析 [J]. 科学通报, 2012, **57**(17): 1317-1325)
- [5] YAO Yibin, ZHANG Bao, YAN Feng, *et al.* Two new sophisticated models for tropospheric delay corrections[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, **58**(5): 1492-1501 (姚宜斌, 张豹, 严凤, 等. 两种精化的对流层延迟改正模型 [J]. 地球物理学报, 2015, **58**(5): 1492-1501)
- [6] SCHÜLER T. The TropGrid2 standard tropospheric correction model[J]. *GPS Solutions*, 2014, **18**(1): 123-131
- [7] BÖHM J, MÖLLER G, SCHINDELEGGER M, *et al.* Development of an improved empirical model for slant delays in the troposphere (GPT2w)[J]. *GPS Solutions*, 2015, **19**(3): 433-441
- [8] YAO Yibin, CAO Na, XU Chaoqian, *et al.* Accuracy assessment and analysis for GPT2[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, **44**(7): 726-733 (姚宜斌, 曹娜, 许超铃, 等. GPT2 模型的精度检验与分析 [J]. 测绘学报, 2015, **44**(7): 726-733)
- [9] GAO Xingwang, LI Fugang, ZHANG Qiuzhao, *et al.* GNSS relative tropospheric delay estimation for large bridge pylon monitoring[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2021, **46**(2): 42-47, 70 (高兴旺, 李付岗, 张秋昭, 等. 大型桥梁桥塔监测的 GNSS 相对对流层延迟估计 [J]. 测绘科学, 2021, **46**(2): 42-47, 70)
- [10] LIU Ning, ZHANG Yongzhi, XIONG Yongliang. A three-step Kalman filter algorithm for near real-time estimating tropospheric wet delay on GPS reference stations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, **40**(7): 918-923 (刘宁, 张永志, 熊永良. GPS 参考站对流层湿延迟近实时估计的三步滤波算法 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2015, **40**(7): 918-923)
- [11] YANG X, CHANG G B, WANG Q X, *et al.* An adaptive Kalman filter based on variance component estimation for a real-time ZTD solution[J]. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 2019, **54**(1): 89-121
- [12] FAN Haopeng, SUN Zhongmiao, YUAN Mingze, *et al.* Method of calculating accurate tropospheric wet delay for local area by meteorological data[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2019, **44**(9): 139-145 (范昊鹏, 孙中苗, 袁明泽, 等. 利用气象数据计算局部对流层湿延迟的方法 [J]. 测绘科学, 2019, **44**(9): 139-145)
- [13] LI B F, FENG Y M, SHEN Y Z, *et al.* Geometry-specified troposphere decorrelation for subcentimeter real-time kinematic solutions over long baselines[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2010, **115**(B11): B11404
- [14] CAO Wentao, GUO Jiming, XIE Xiang, *et al.* Influence of horizontal gradients on precise point positioning[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2014(2): 13-15, 25 (曹文涛, 郭

- 际明, 谢翔, 等. 对流层水平梯度对 PPP 的影响 [J]. 测绘通报, 2014(2): 13-15,25)
- [15] FAN Haopeng, SUN Zhongmiao, ZHANG Liping, *et al.* A two-step estimation method of troposphere delay with consideration of mapping function errors[J]. *Acta Geodetica et Cartographica Sinica*, 2019, **48**(3): 286-294 (范昊鹏, 孙中苗, 张丽萍, 等. 顾及映射函数误差的对流层延迟两步估计法 [J]. 测绘学报, 2019, **48**(3): 286-294)
- [16] LI X, HUANG G W, ZHANG Q, *et al.* A new GPS/BDS tropospheric delay resolution approach for monitoring deformation in super high-rise buildings[J]. *GPS Solutions*, 2018, **22**(3): 90
- [17] BOCK O, DOERFLINGER E. Atmospheric modeling in GPS data analysis for high accuracy positioning[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 2001, **26**(6/7/8): 373-383
- [18] MEINDL M, SCHAER S, HUGENTOBLER U, *et al.* Tropospheric gradient estimation at CODE: results from global solutions[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2004, **82**(1B): 331-338
- [19] LI Li, KUANG Cuilin, ZHU Jianjun, *et al.* Influence analysis of horizontal gradients and mapping functions on tropospheric delay estimation[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2011, **39**(5): 52-56,60 (李黎, 匡翠林, 朱建军, 等. 水平梯度和映射函数对 PPP 对流层延迟估计的影响分析 [J]. 工程勘察, 2011, **39**(5): 52-56,60)
- [20] XU Huaguan, CHENG Zongyi. The comparison and analysis of the parameter estimation methods for tropospheric refraction on GPS precise positioning[J]. *Annals of Shanghai Observatory Academia Sinica*, 1997, **18**: 95-102 (许华冠, 程宗颐. GPS 精密定位中对流层折射参数估计方法的比较分析 [J]. 中国科学院上海天文台年刊, 1997, **18**: 95-102)
- [21] GENG J H, CHEN X Y, PAN Y X, *et al.* PRIDE PPP-AR: an open-source software for GPS PPP ambiguity resolution[J]. *GPS Solutions*, 2019, **23**(91): 1-10
- [22] WEI Erhu, LIU Xuexi, WANG Lingxuan, *et al.* Analysis and assessment of BDS/GPS combined precise point positioning accuracy[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, **43**(11): 1654-1660 (魏二虎, 刘学习, 王凌轩. BDS/GPS 组合精密单点定位精度分析与评价 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2018, **43**(11): 1654-1660)

## 作者简介



邓 标 男, 1981 年 9 月出生于安徽省亳州市. 现为滁州学院地理信息与旅游学院高级工程师, 主要研究方向为 GNSS 数据处理与精密工程测量.  
E-mail: [dsc9921@163.com](mailto:dsc9921@163.com)



王伟娜 (通信作者) 女, 1981 年 10 月出生于河北省保定市, 现为上海城建职业学院数字建造学院副教授, 主要研究方向为 GIS 空间分析以及工程测量技术.  
E-mail: [wangweina@succ.edu.cn](mailto:wangweina@succ.edu.cn)